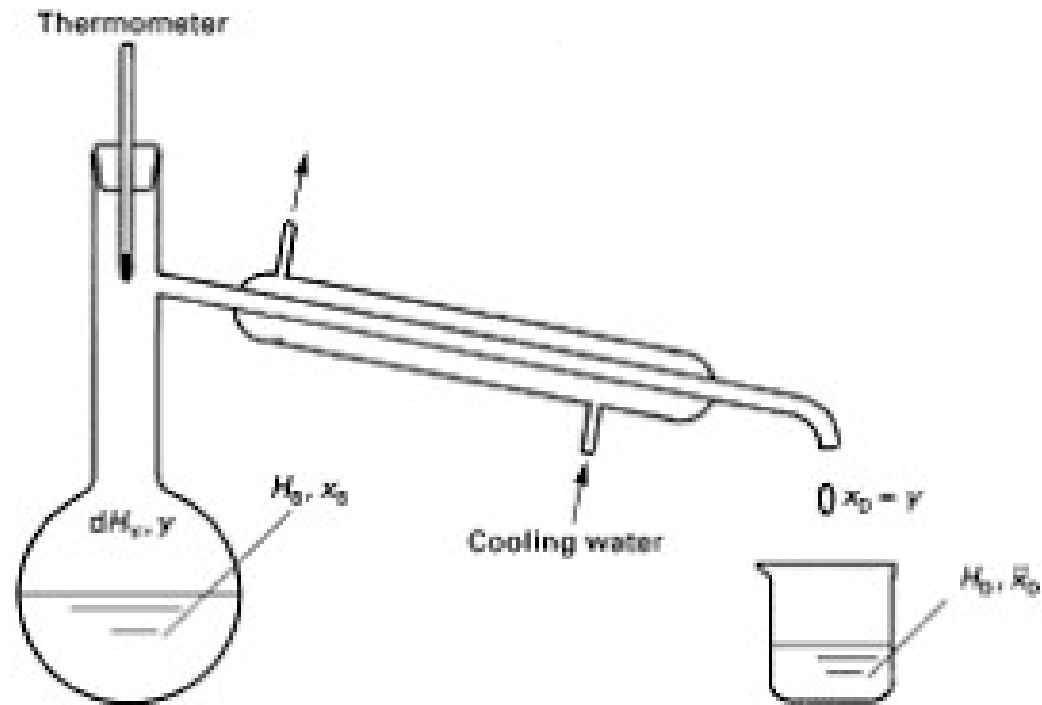


Φυσικές Διεργασίες Ι



- ΑΠΛΕΣ ΑΠΟΣΤΑΞΕΙΣ: Απόσταξη Ισορροπίας- Διαφορική Απόσταξη
 - ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΣΤΑΞΗ

ΧΡΙΣΤΑΚΗΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Απόσταξη



Απόσταξη

- Είναι μια μέθοδος διαχωρισμού των συστατικών ενός μίγματος, η οποία βασίζεται στην **κατανομή των συστατικών μεταξύ των φάσεων ατμού και υγρού**.
- Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου όλα τα συστατικά του μίγματος είναι παρόντα και στις δύο φάσεις.
- Η μία φάση προκύπτει από την άλλη με απλή εξάτμιση ή συμπύκνωση

Απλές Αποστάξεις

- Απόσταξη ισορροπίας (Equilibrium or Flash distillation)
- Διαφορική Απόσταξη (Differential distillation)

Οι απλές αποστάξεις και χρησιμοποιούνται σε μονάδες μικρών όγκων παραγωγής ή σε συστήματα εργαστηριακής κλίμακας.

Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (Equilibrium ή Flash Distillation)-
Στιγμαιαία εξάρτηση

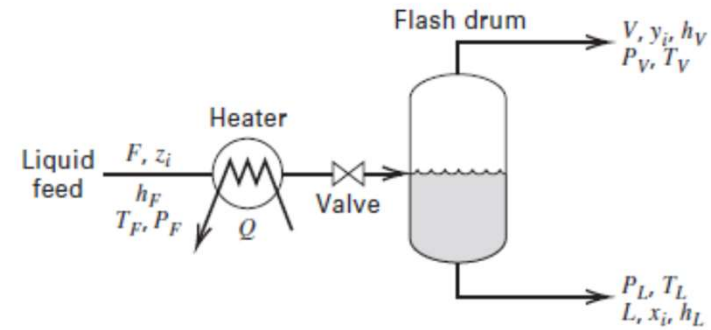
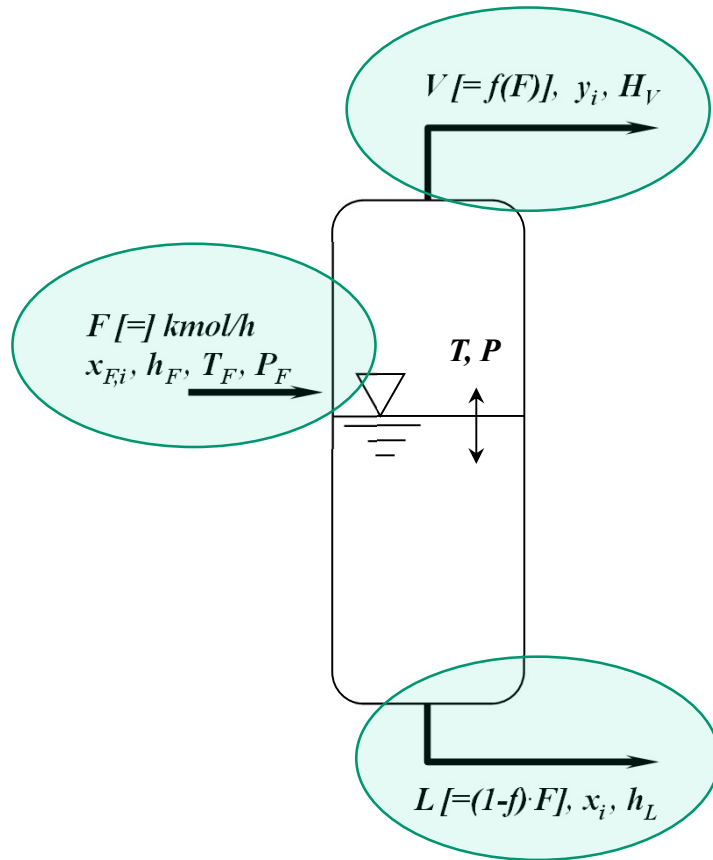


Figure 4.8 Continuous flash vaporization

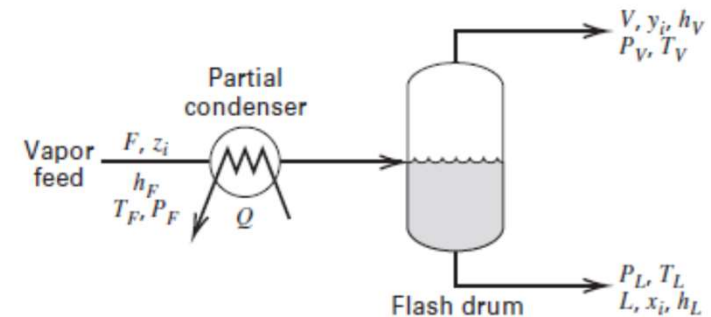


Figure 4.9 Continuous partial condensation.

Διάταξη απόσταξης ισορροπίας (Equilibrium or Flash Distillation)

Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)

F ([=] kmol (ή σε kmol/h) συνεχής τροφοδοσία
 $x_{F,i}$ στο πτητικότερο συστατικό (συστατικό
ενδιαφέροντος).

Πίεση τροφοδοσίας, P_F ,

Θερμοκρασία τροφοδοσίας, T_F

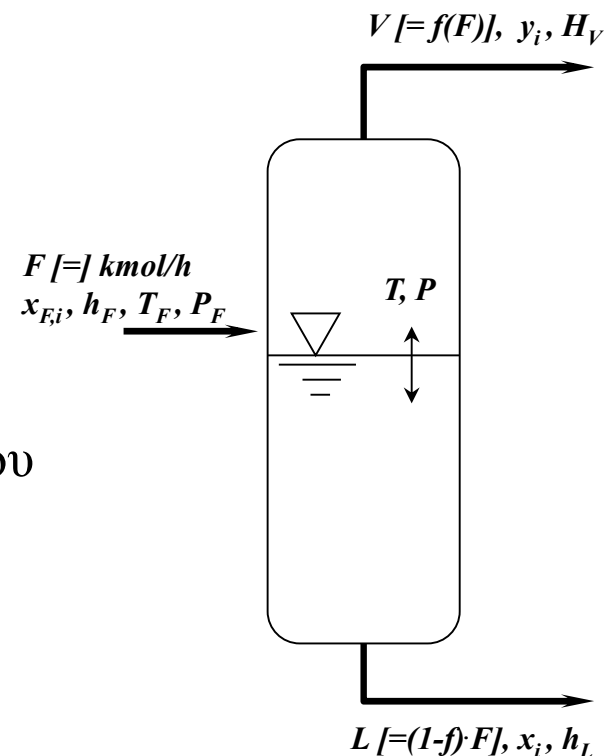
Ειδική ενθαλπία h_F .

Με την **εκτόνωση**

V ([=] kmol ή kmol/h) οδεύουν στην φάση του
ατμού και

L ([=] kmol ή kmol/h) στην **υγρή φάση** με
συστάσεις στο πτητικό συστατικό y_i και x_i ,
αντίστοιχα.

Ανάλογα, η ειδική ενθαλπία των ατμών είναι H_V
και του υγρού h_L .



Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)

Ορίζουμε ως κλάσμα στιγμιαίας εξάτμισης, f :

κλάσμα των moles της τροφοδοσίας που εξατμίζεται, $f = V/F$

και

$1-f = 1 - (V/F)$, κλάσμα των moles της τροφοδοσίας που δεν εξατμίζεται

$$0 < f < 1$$

Ολικό Ισοζύγιο

$$F = V + L$$

Ισοζύγιο πτητικού

$$F x_{F,i} = V y_i + L x_i$$

$$\frac{F}{V} x_{F,i} - \frac{L}{V} x_i = y_i$$

$$\frac{F}{V} = \frac{1}{f}$$

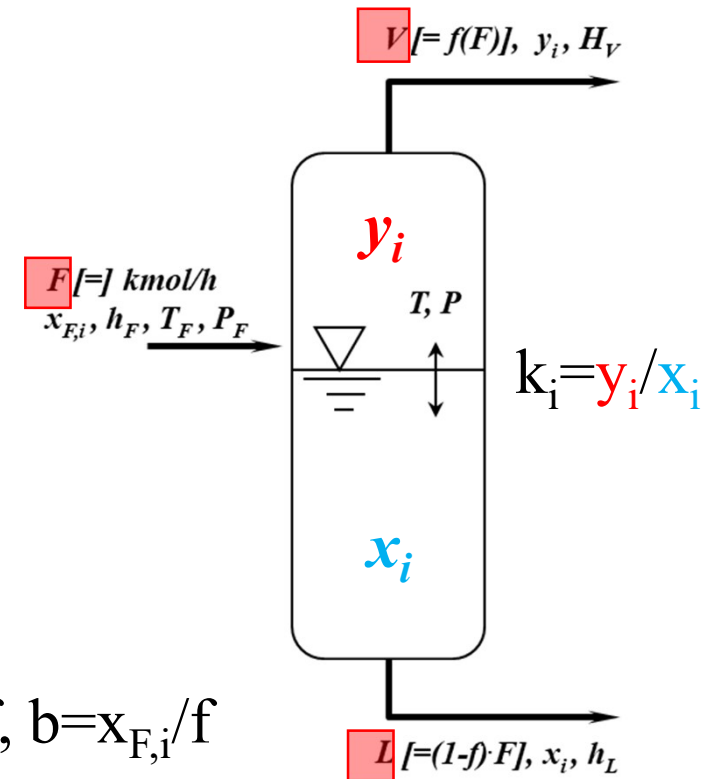
$$\frac{L}{V} = \frac{F-V}{V} = \frac{F}{V} - 1 = \frac{1}{f} - 1 = \frac{(1-f)}{f}$$

$$\frac{x_{F,i}}{f} - \frac{(1-f)}{f} x_i = y_i$$

Λύνοντας ως προς y_i παίρνουμε

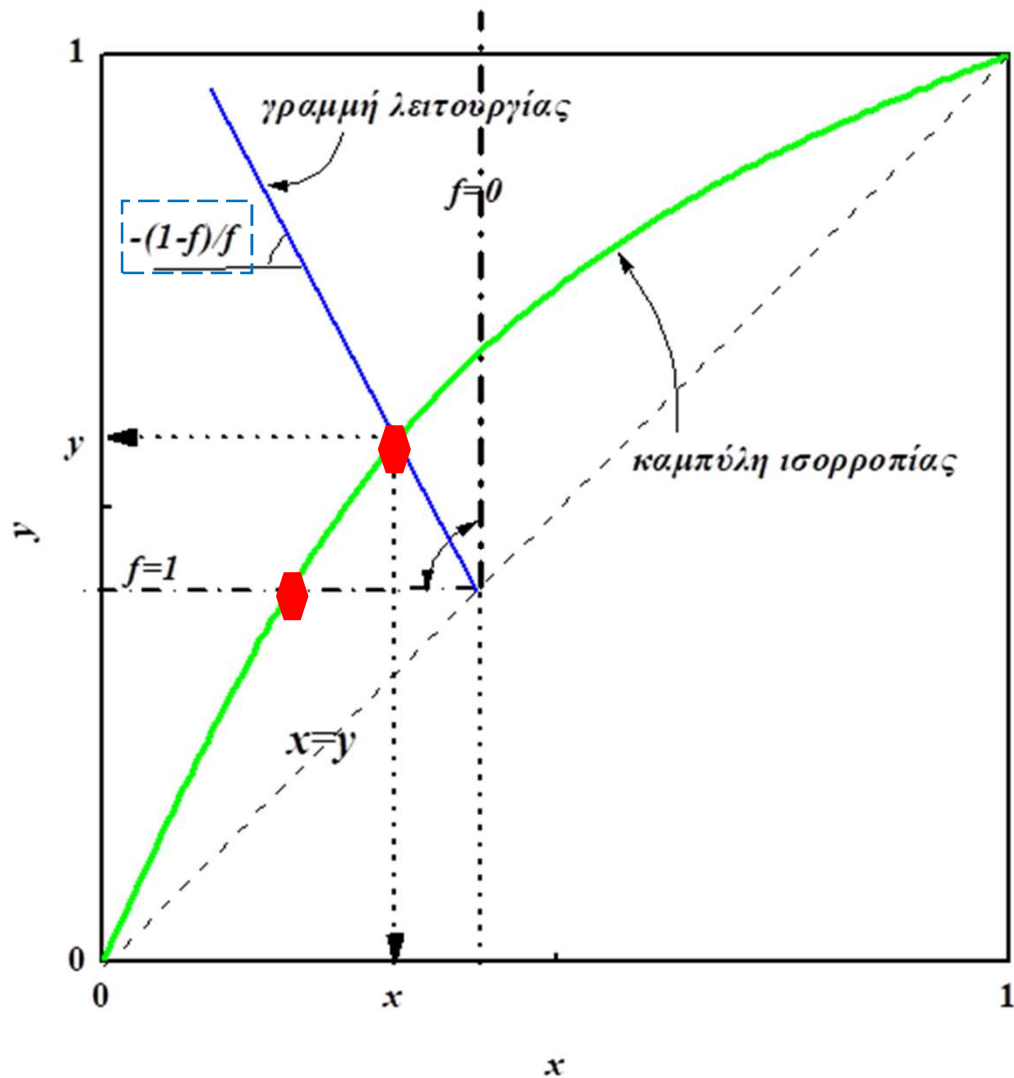
$$y_i = -\frac{1-f}{f} x_i + \frac{x_{F,i}}{f}$$

$$y(P,T) = ax + b, \quad a = -(1-f)/f, \quad b = x_{F,i}/f$$

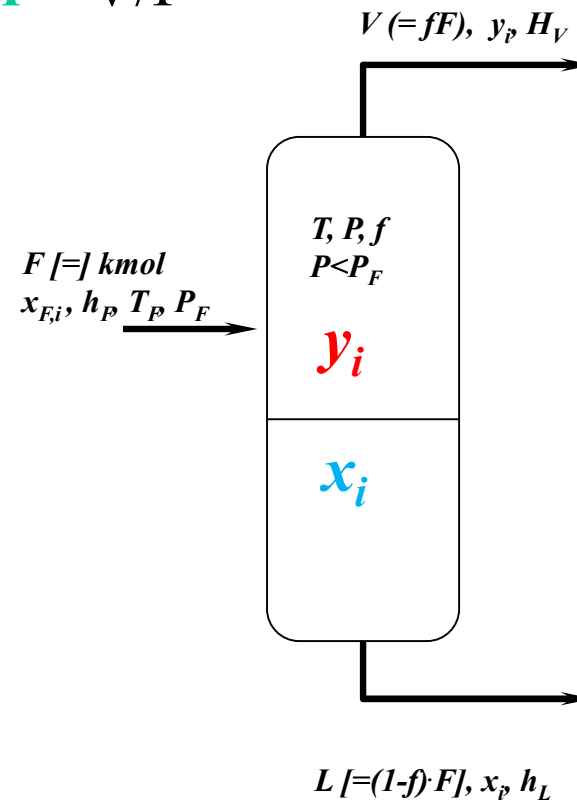


Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)



$$f = V/F$$



Γραμμή λειτουργίας

$$y_i = -\frac{1-f}{f}x_i + \frac{x_{F,i}}{f}$$

Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)

Επίλυση με χρήση και ισοζυγίου ενέργειας:

$$Fx_{F,i} = Vy_i + Lx_i$$

$$F = V + L$$

$$\frac{F}{F}x_{F,i} = \frac{L}{F}x_i + \frac{V}{F}y_i$$

$$\frac{V}{F} = f$$

$$\frac{L}{F} = \frac{F - V}{F} = 1 - \frac{V}{F} = 1 - f$$

$$x_{F,i} = (1 - f_i)x_i + fy_i = x_i - f_i x_i + fy_i$$

$$= x_i - f_i x_i + fy_i = x_i + f_i(y_i - x_i)$$

$$(x_{F,i} - x_i) = f_i(y_i - x_i)$$

$$f(T) = \frac{x_{F,i} - x_i}{y_i - x_i} \xrightarrow{(2.64)} f(T) = \frac{x_{F,i} - 1 + k_j(T, P)}{k_i(T, P) + k_j(T, P) - k_i(T, P)k_j(T, P) - 1}$$

$$y_i = k_i(T, P)x_i \quad x_i = \frac{1 - k_j(T, P)}{k_i(T, P) - k_j(T, P)}$$

$$h_F = fH_V + (1 - f)h_L \Rightarrow f(T) = \frac{h_F - h_L}{H_V - h_L}$$

Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)

Επίλυση με χρήση ισοζυγίου ενέργειας:

$$F h_F = V H_V + L h_L$$

$$h_F = \frac{V}{F} H_V + \frac{L}{F} h_L$$

$$\frac{V}{F} = f$$

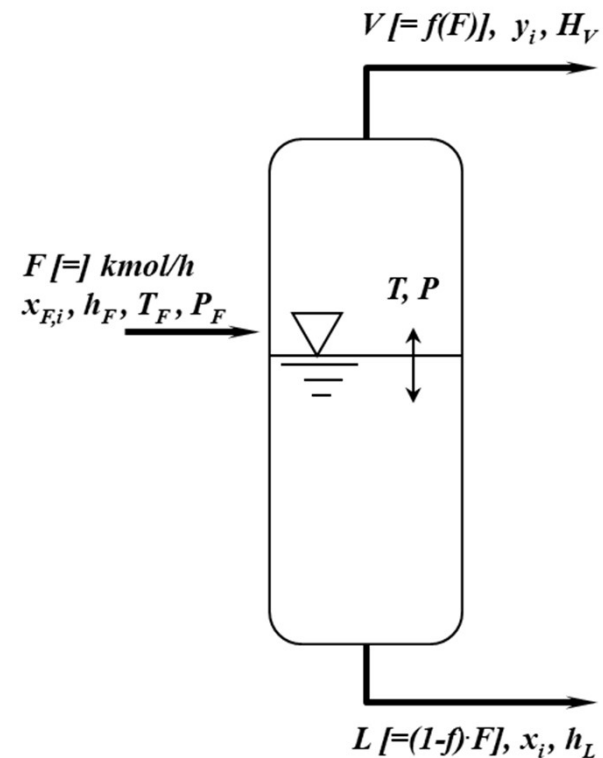
$$\frac{L}{V} = 1 - f$$

$$h_F = f H_v + (1 - f)h_L$$

$$h_F = f H_v + h_L + f h_L$$

$$h_F - h_L = f (H_V - h_L)$$

$$f(T) = \frac{(h_F - h_L)}{(H_V - h_L)}$$



Απλές Αποστάξεις –

(α) Απόσταξη Ισορροπίας (equilibrium ή Flash Distillation)

Επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη στιγμιαίας εξάτμισης. (Θ.Ε.Β.= θερμοκρασία ενάρξεως βρασμού, Θ.Ε.Υ.= θερμοκρασία ενάρξεως υγροποίησης)

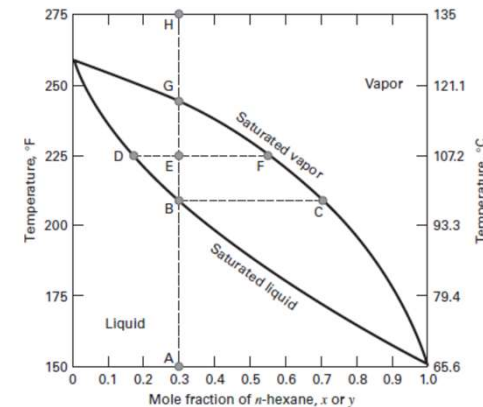
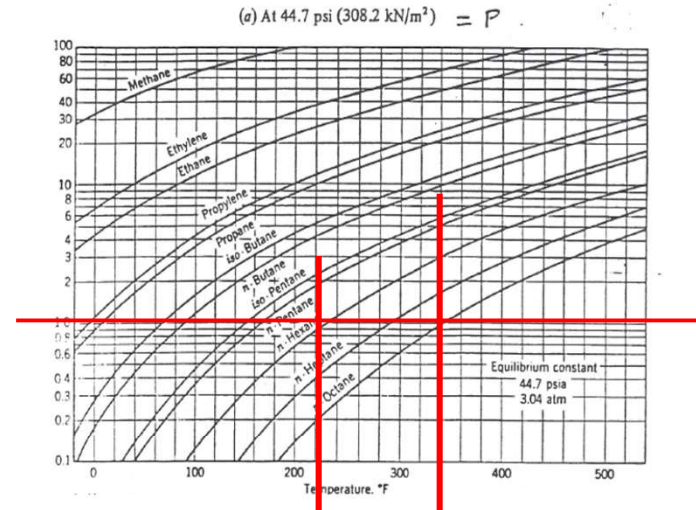
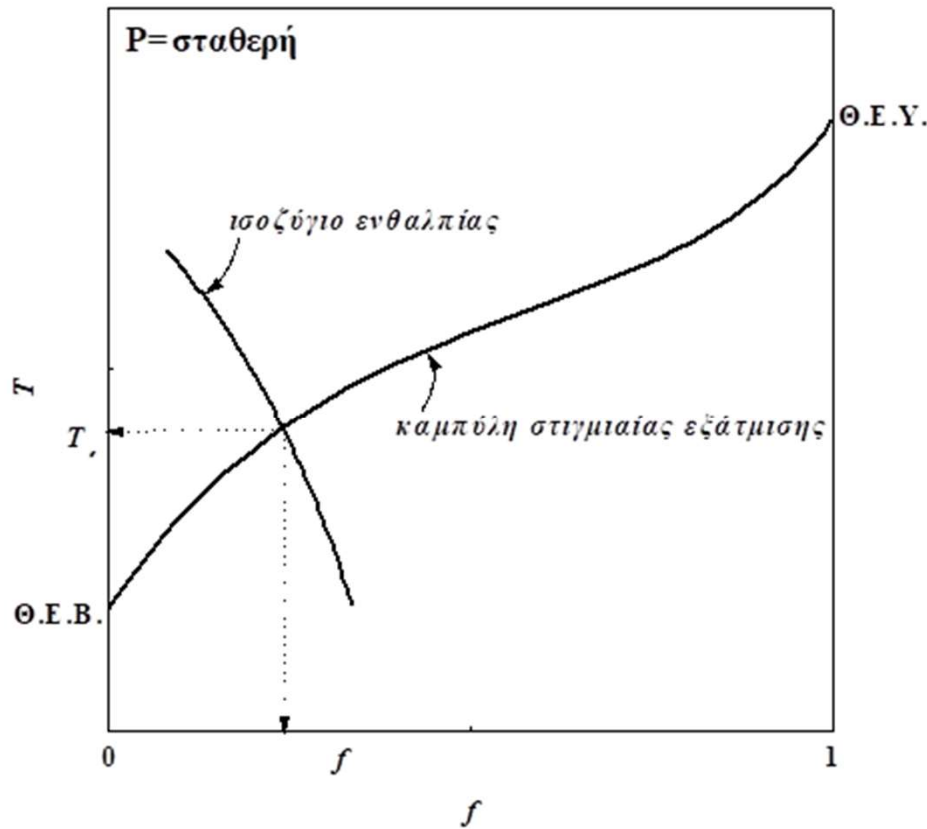


Figure 4.4 T-y, x phase equilibrium diagram for the n-hexane-n-octane system at 1 atm.

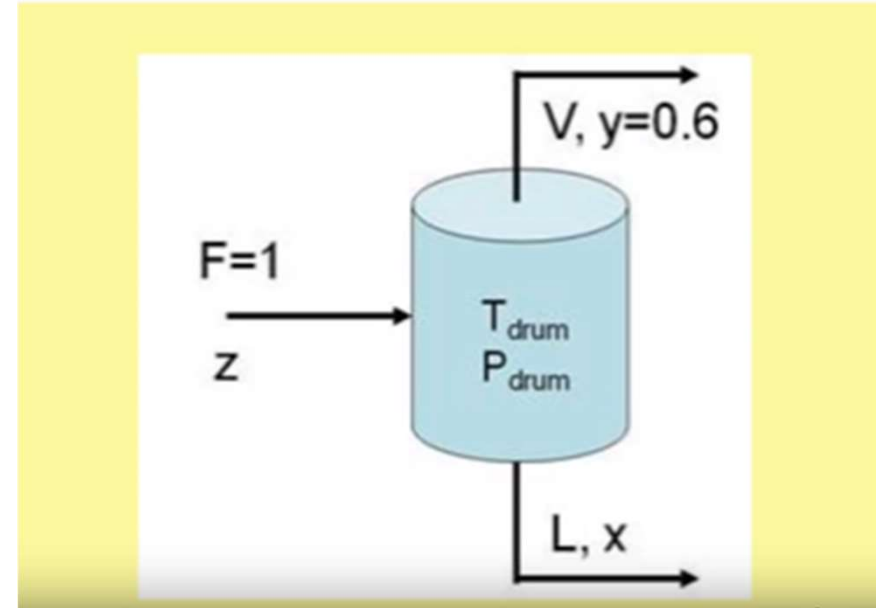
$$f(T) = \frac{x_{F,i} - 1 + k_j}{k_i + k_j - k_i k_j - 1}$$

$$f(T) = \frac{(h_F - h_L)}{(H_V - h_L)}$$

29/10/2020

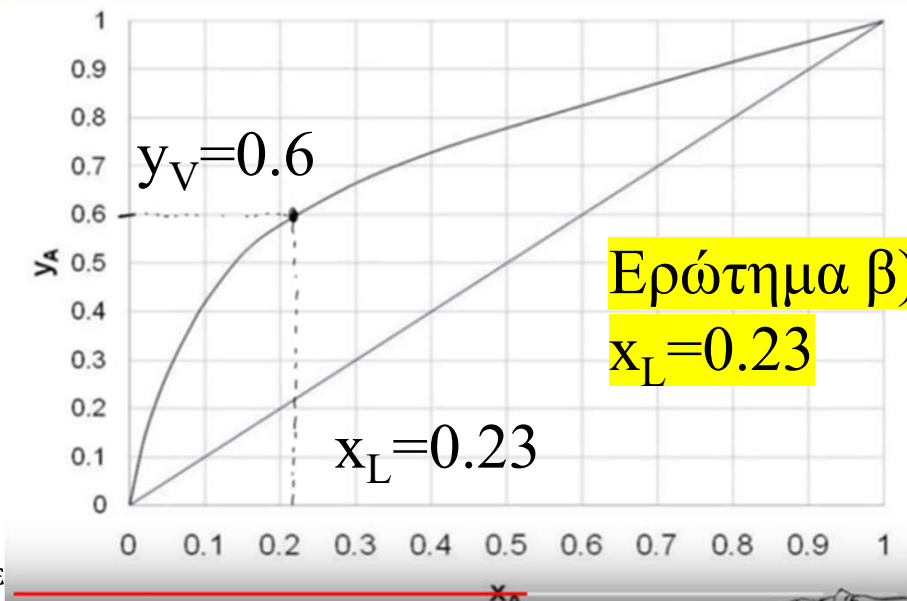
Απόσταξη Ισορροπίας

Μίγμα Μεθανόλης- Νερού οδηγείται σε μια αποστακτική στήλη ισορροπίας (flash distillation). Η σύσταση των ατμών σε μεθανόλη στην κορυφή (απόσταγμα) είναι $y_V=0.6$ και ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι $F=1$ kmol/hr. Ο λόγος υγρού/ατμών, είναι ίσος $L/V = 1$.



Απαντήστε στα κάτωθι ερωτήματα:

- α) Ποια είναι γραμμή λειτουργίας για το σύστημα αυτό?
- β) Ποια είναι η σύσταση σε μεθανόλη στο υγρό υπόλειμμα, x_L ?
- γ) Ποια είναι η σύσταση σε μεθανόλη στην τροφοδοσία?



Απόσταξη Ισορροπίας

α) Ποια είναι γραμμή λειτουργίας για το σύστημα αυτό

Το ισοζύγιο μάζας δίνει

$$F x_F = V y + L x \quad \text{διαιρούμε με το } V$$

$$\frac{F}{V} x_F = \frac{V}{V} y + \frac{L}{V} x$$

$$\text{Γνωρίζουμε ότι } F = L + V, \text{ και } \frac{L}{V} = 1$$

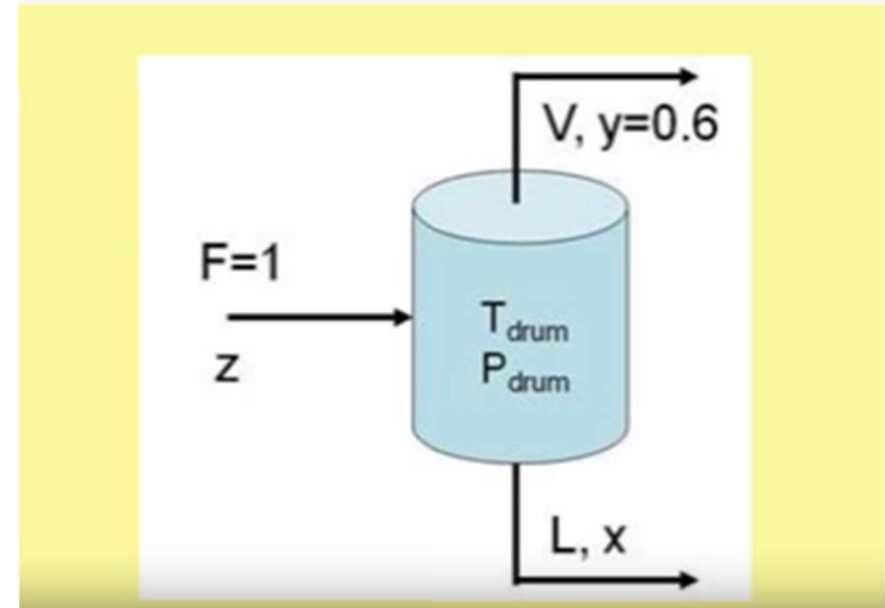
$$\frac{(L + V)}{V} x_F = y + x$$

$$\left(\frac{L}{V} + \frac{V}{V}\right) x_F = y + x$$

$$2 x_F = y + x$$

$$y = -x + 2 x_F$$

Κλίση = -1 (-45°), αποτέμνουσα ίση με $2 x_F$



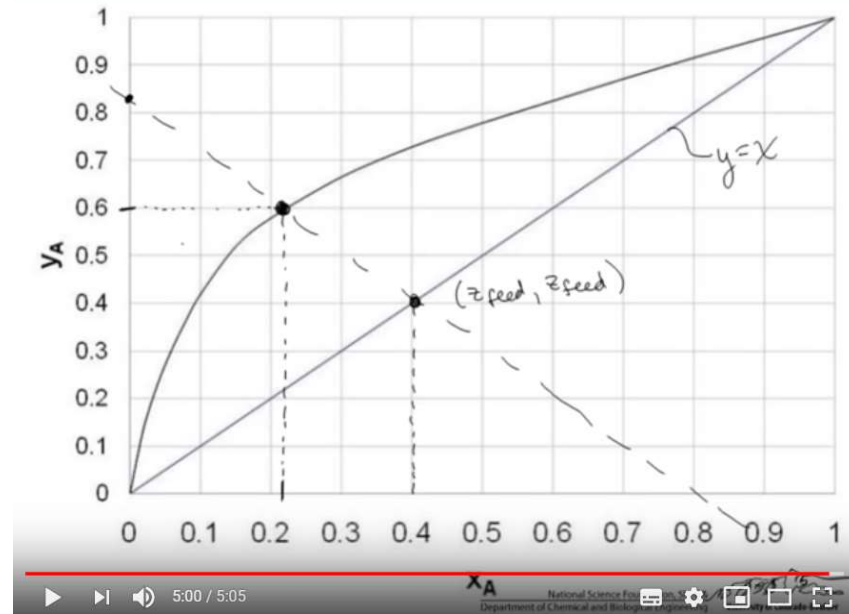
Απόσταξη Ισορροπίας

α) Ποια είναι γραμμή λειτουργίας για το σύστημα αυτό?

Βρήκαμε ότι η γραμμή λειτουργίας δίνεται από τη σχέση

$$y = -x + 2x_F \text{ με κλίση } (-1)$$

Επίσης γνωρίζουμε ότι στο απόσταγμα έχουμε $y_v=0.6$
Φέρουμε στο σημείο ($y_v=0.6$ και $x_L=0.23$) ευθεία, με κλίση (-1). Τα άκρα της ευθείας συναντάνε τον άξονα y στο 0.8 και τον άξονα x , επίσης στο 0.8. Αυτή η τιμή αντίστοιχη στην αποτέμνουσα της γραμμής λειτουργίας $2x_F=0.8$, οπότε $x_F=0.4$



Ερώτημα γ) η γραμμή λειτουργίας συναντά την διαγώνιο στο σημείο (x_F, x_F) (0.4, 0.4). Άρα και εδώ υπολογίζουμε ότι η σύσταση της μεθανόλης στην τροφοδοσία είναι 40% μεθανόλη και 60 % νερό.

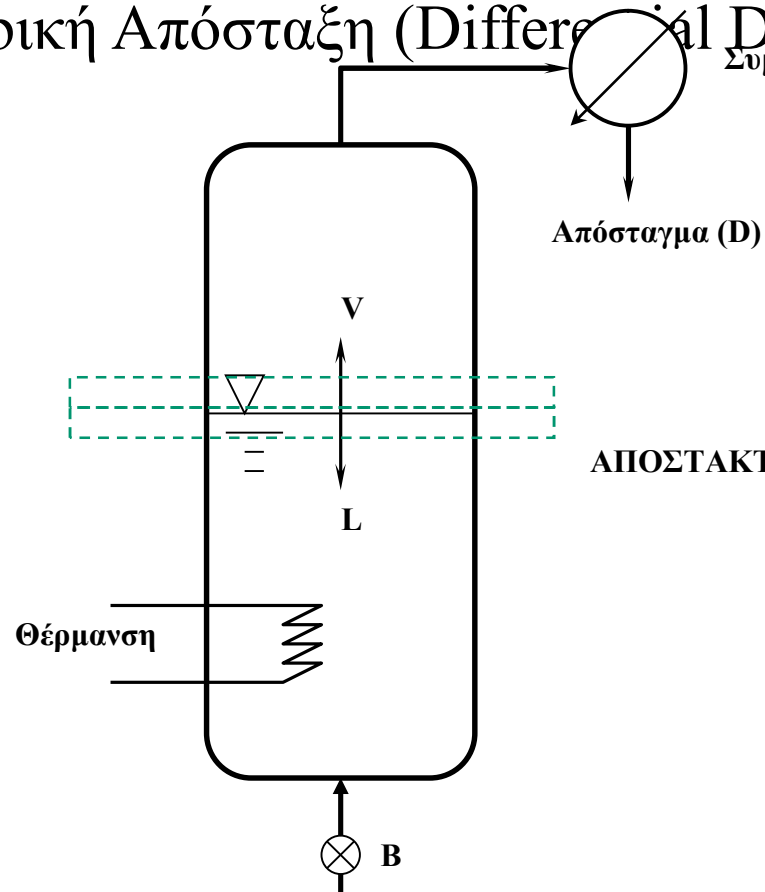
Απλές Αποστάξεις –

(α) Διαφορική Απόσταξη [Differential Distillation, (batch)]



Απλές Αποστάξεις –

(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)



Παραδοχή:

Οι παραγόμενοι ατμοί βρίσκονται σε **ισορροπία** με το υγρό του αποστακτήρα, ανά πάσα στιγμή

Η θερμοκρασία

μεταβάλλεται (**αυξάνεται**) συνεχώς, λόγω μεταβολής της σύστασης του υγρού, ενώ η πίεση παραμένει σταθερή.

Σχήμα 2.15: Διάταξη διαφορικής απόσταξης

Απλές Αποστάξεις –

(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Ανάλυση της διαφορικής απόσταξης

Δεδομένου ότι η ποσότητα του υγρού που εγκαταλείπει την υγρή φάση πάει στην φάση ατμών, μπορούμε να γράψουμε ένα διαφορικό ισοζύγιο μάζας

$$d(y_i V) = -d(Lx_i) \rightarrow y_i dV + V dy_i = -x_i dL - L dx_i$$

$$V dy_i \cong 0$$

Εξίσωση του *Rayleigh*

$$y_i dV = -x_i dL - L dx_i \quad \frac{dL}{L} = \frac{dx_i}{y_i - x_i} \quad \ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_{i,2}}^{x_{i,1}} \frac{dx_i}{y_i - x_i}$$

x_i, y_i : το γραμμομοριακό κλάσμα του πτητικού συστατικού στο υγρό ή στον ατμό, αντίστοιχα, σε κάθε χρονική στιγμή,

$x_{i,1}, x_{i,2}$: η αρχική και η τελική σύσταση του πτητικού συστατικού στην υγρή φάση, και

L_1, L_2 : η αρχική και τελική ποσότητα της υγρής φάσης.

Απλές Αποστάξεις –

(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Ανάλυση της διαφορικής απόσταξης

$$\ln \frac{V_1}{V_2} = \int_{y_{i,2}}^{y_{i,1}} \frac{dy_i}{x_i - y_i}$$

$$y_i = \frac{a_{ij} x_i}{1 + (a_{ij} - 1)x_i}$$

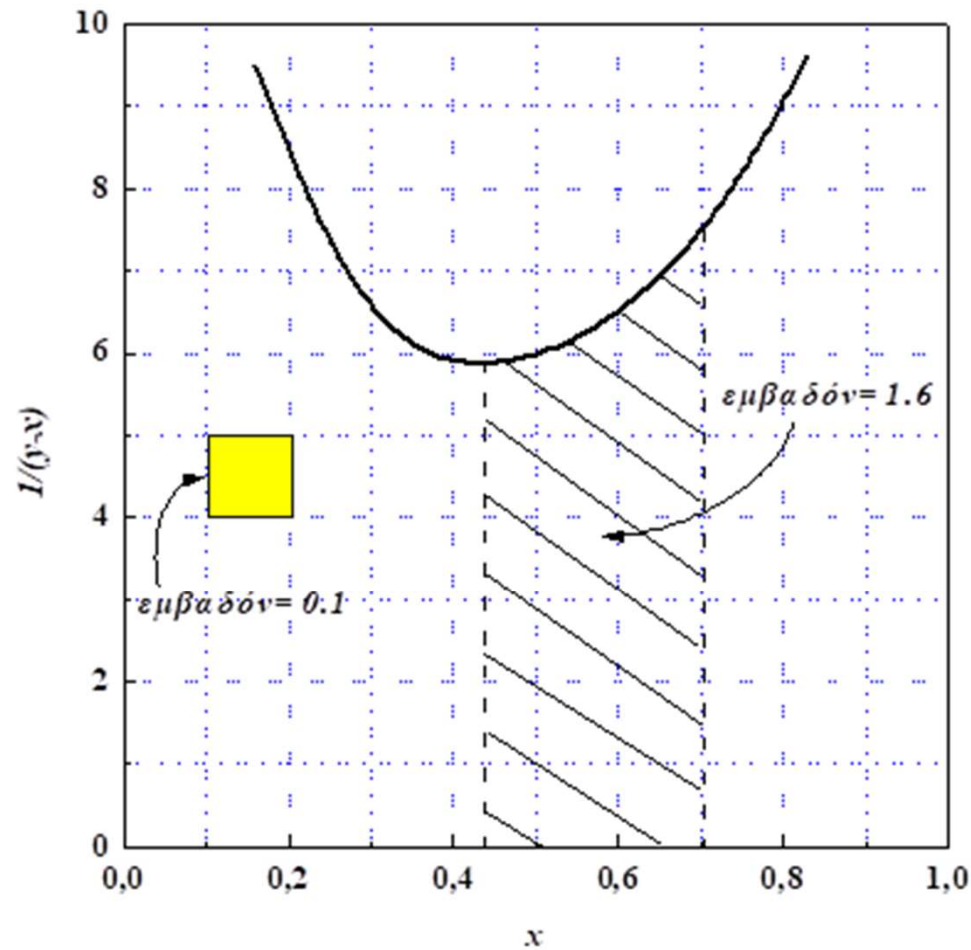
$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \frac{1}{(a_{ij} - 1)} \ln \frac{x_{i,1}(1 - x_{i,2})}{x_{i,2}(1 - x_{i,1})} + \ln \frac{(1 - x_{i,2})}{(1 - x_{i,1})}$$

Απλές Αποστάξεις –

(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Ανάλυση της διαφορικής απόσταξης

$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_{i,2}}^{x_{i,1}} \frac{dx_i}{y_i - x_i}$$



Απλές Αποστάξεις –(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Παράδειγμα: Ένα μίγμα 100 kmol που περιέχει 70% επτάνιο και 30% οκτάνιο πρόκειται να διαχωριστεί με διαφορική απόσταξη σε πίεση 20 psia. Ποια θα είναι η σύσταση του αποστάγματος όταν 80% από το αρχικό μίγμα έχει εξατμιστεί; Δίδεται ο παρακάτω πίνακας των συντελεστών κατανομής του επτανίου και οκτανίου συναρτήσει της θερμοκρασίας στα 20 psia. (Πτητικό το επτάνιο, $x_F=0.7, L_1=100$ kmol, $L_2=20$ kmol)

ΠΙΝΑΚΑΣ Π2.15: Συντελεστές κατανομής του επτανίου και του οκτανίου σε διάφορες θερμοκρασίες και σταθερή πίεση $P=20$ psia.

$T(^{\circ}F)$	k_{c7}	k_{c8}
228	1.00	0.441
230	1.02	0.460
240	1.20	0.550
250	1.35	0.650
260	1.55	0.755
270	1.78	0.860
280	2.00	1.000

Έχουμε επιλέξει τιμές του συντελεστή κατανομής για το επτάνιο να είναι πάντα $k_{c7} > 1$ και για το οκτάνιο τιμές για το $k_{c8} < 1$

Απλές Αποστάξεις –(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

ΛΥΣΗ

θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Rayleigh και να υπολογίσουμε τα όρια του ολοκληρώματος αφού γνωρίζουμε τις τιμές L_1 και L_2 που εμφανίζονται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης. Για να προχωρήσουμε σε γραφική ολοκλήρωση της εξίσωσης Rayleigh είναι απαραίτητη η γραφική απεικόνιση της ποσότητας $1/(y-x)$ συναρτήσει του x , όπως υποδεικνύει η εξίσωση. Με την βοήθεια των τιμών του πίνακα και τις σχέσεις για τον υπολογισμό των x_i , y_i από τιμές των συντελεστών κατανομής βρίσκουμε:

$$\ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_{i,2}}^{x_{i,1}} \frac{dx_i}{y_i - x_i} \quad x = \frac{1 - k_{C8}}{k_{C7} - k_{C8}} \quad y = k_{C7}x$$

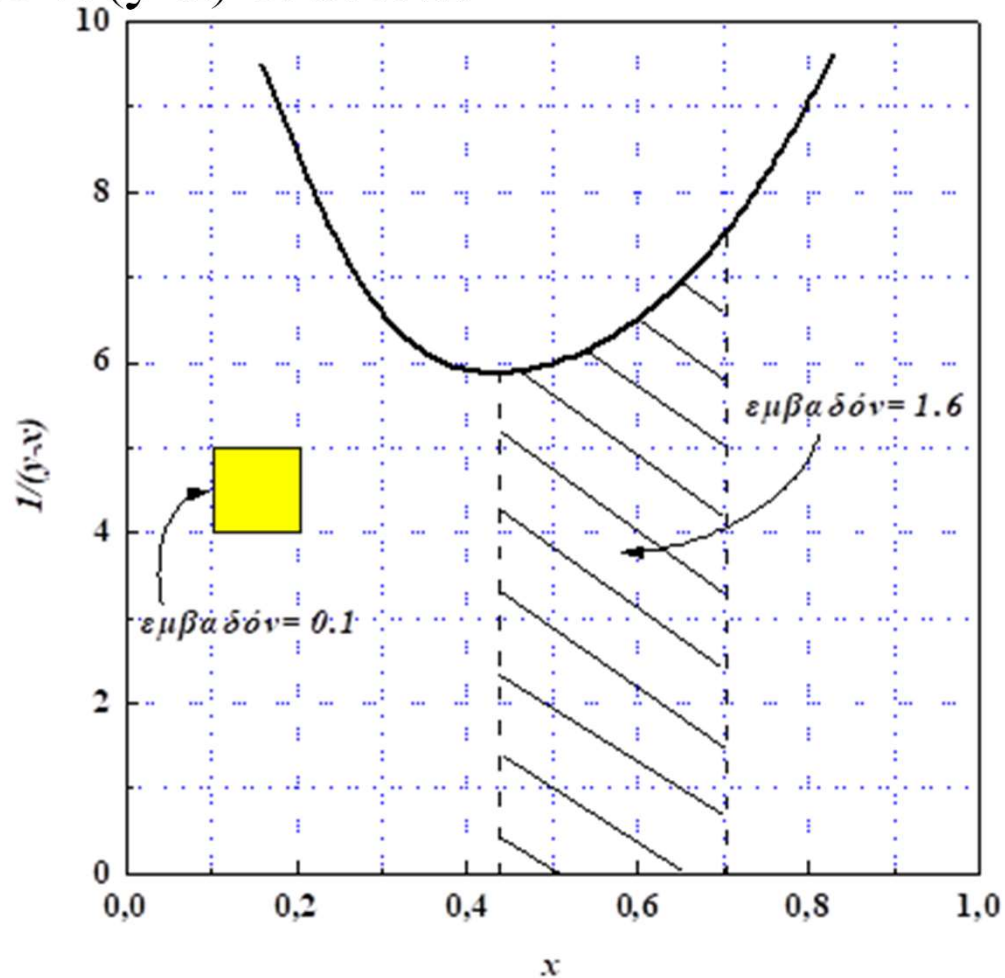
Απλές Αποστάξεις –(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα για την εύρεση των x , y και $1/(y-x)$.

T(°F)	kC7	kC8	$x = \frac{1-k_{C8}}{k_{C7}-k_{C8}}$	$y = k_{C7}x$	$\frac{1}{y-x}$
228	1.00	0.441	1.000	1.000	∞
230	1.02	0.460	0.965	0.984	52.63
240	1.20	0.550	0.693	0.832	7.194
250	1.35	0.650	0.500	0.675	5.714
260	1.55	0.755	0.308	0.477	5.917
270	1.78	0.860	0.152	0.271	8.403
280	2.00	1.000	0.000	0.000	∞

Απλές Αποστάξεις –(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Από τα δεδομένα του Πίνακα κατασκευάζουμε το διάγραμμα που αναπαριστά το $1/(y-x)$ έναντι x :



$$\ln \frac{100}{20} = 1.61$$

Απλές Αποστάξεις –(α) Διαφορική Απόσταξη (Differential Distillation)

Η λύση βρίσκεται με δοκιμή και σφάλμα: Έχοντας γνωστό το $x_1=0.7$, μεταβάλλουμε την τιμή του x_2 έως ότου το υπολογιζόμενο εμβαδόν γίνει ίσο με

$$\ln \frac{100}{20} = 1.61 = \int_{x_2}^{0.7} \frac{1}{y-x} dx$$

αφού γνωρίζουμε ότι $L_1=100$ kmol, $L_2=(1-0.8) \times 100=20$ kmol

Βλέπουμε ότι για $x_2=0.44$ το εμβαδόν που δείχνεται στο σχήμα είναι ίσο με 1.6 και έτσι ικανοποιείται η ισότητα που απαιτεί η εξίσωση Rayleigh

Ως εκ τούτου, το υγρό που μένει στον αποστακτήρα έχει σύσταση:

$$x_{C8}=0.56, \quad x_{C7}=0.44$$

Από απλά ισοζύγια μάζας, υπολογίζουμε και το προϊόν κορυφής (απόσταγμα):

$$\text{Για } C_7: 70-(0.44 \times 20) = 61.2 \text{ kmol, } y_{C7}=0.765 (=61.2/70)$$

$$\text{Για } C_8: 30-(0.56 \times 20) = 18.8 \text{ kmol, } y_{C8}=0.235 (18.8/70)$$

Κλασματική Απόσταξη

- Είναι η διεργασία διαχωρισμού μίγματος σε στήλη **επαφής ατμών-υγρού**, όπου οι ατμοί ρέουν κατ' αντιστροφή προς το υγρό και επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων καθ' όλο το ύψος της στήλης.
- Η κατεύθυνση του ατμού-υγρού είναι προς τα πάνω και η συγκέντρωση των πτητικών αυξάνεται προς την κατεύθυνση ροής του ατμού
- Η επαφή ατμών-υγρού επιτυγχάνεται με ειδικούς δίσκους (**στάδια ή βαθμίδες**), εξ' ου και η ονομασία «Αποστακτικές στήλες με δίσκους»

Κλασματική Απόσταξη



Κλασματική Απόσταξη

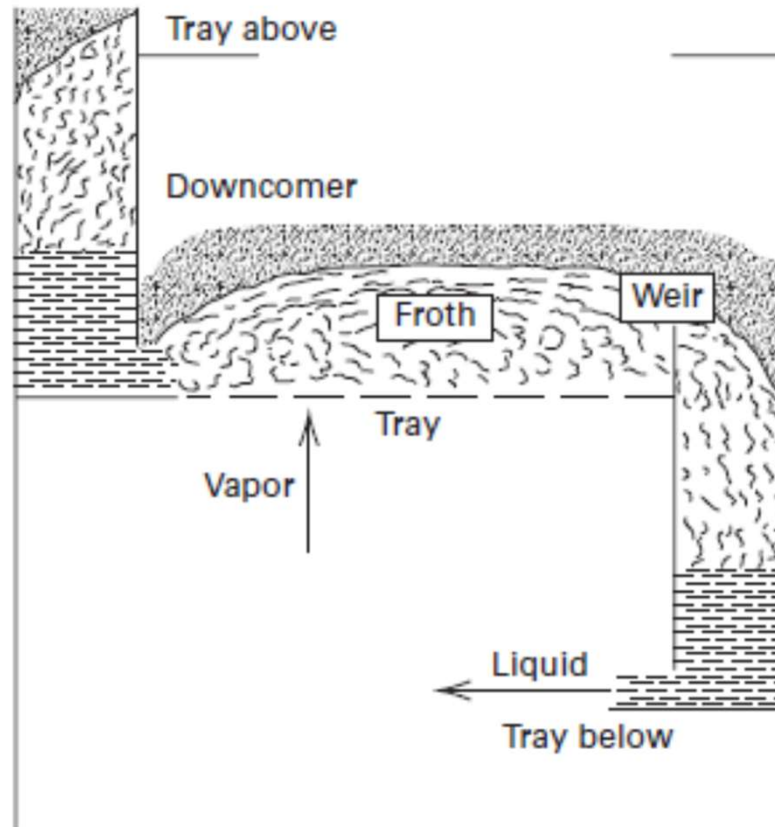


Figure 5.8 Typical vapor-liquid contacting tray.

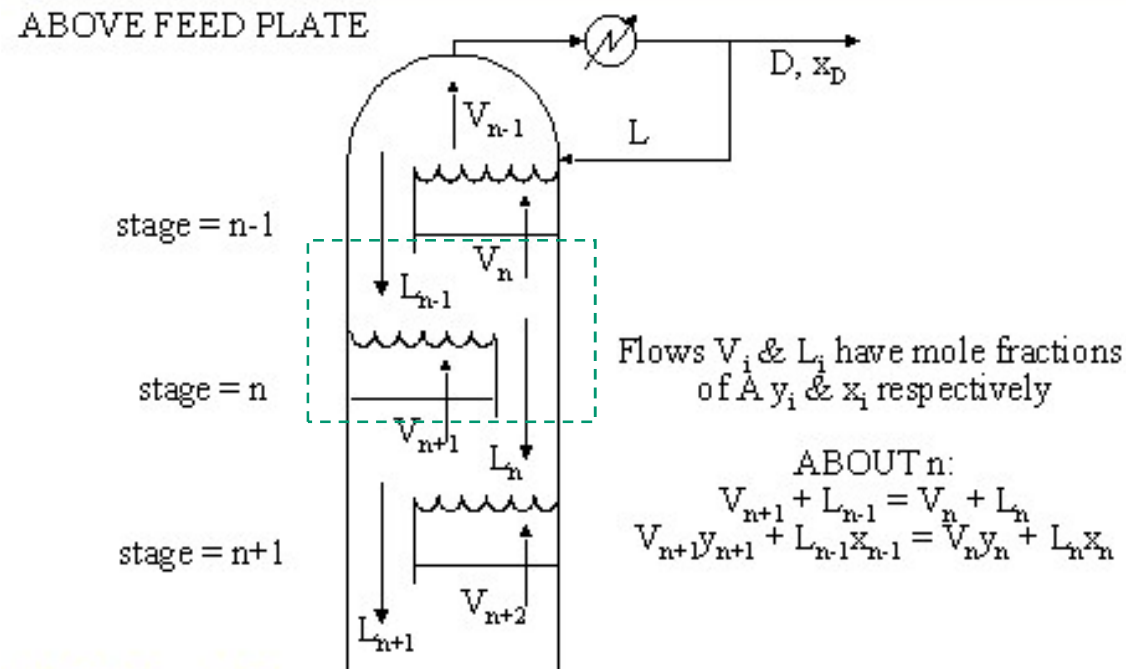
Κλασματική Απόσταξη

- Η κλασματική απόσταξη σε βαθμίδες μπορεί να θεωρηθεί σαν μια σειρά απλών «αποστάξεων ισορροπίας», όπου τα προϊόντα μιας βαθμίδας είναι τροφοδοσίες των προσκειμένων, άνω και κάτω, βαθμίδων.
- Η αποστακτική στήλη συνοδεύεται από ένα Αναβραστήρα (στον πυθμένα) και ένα συμπυκνωτήρα (στην κορυφή)
- Η τροφοδότηση (F) είναι εισάγεται συνήθως κοντά στο μέσον της στήλης χωρίζοντας την σε τμήμα εμπλουτισμού και εξάντλησης
- Η πίεση λειτουργίας θεωρείται σταθερή σε όλο μήκος της στήλης

Κλασματική Απόσταξη

Unit Operations 1 - Distillation

Fractional distillation - McCabe/Thiele

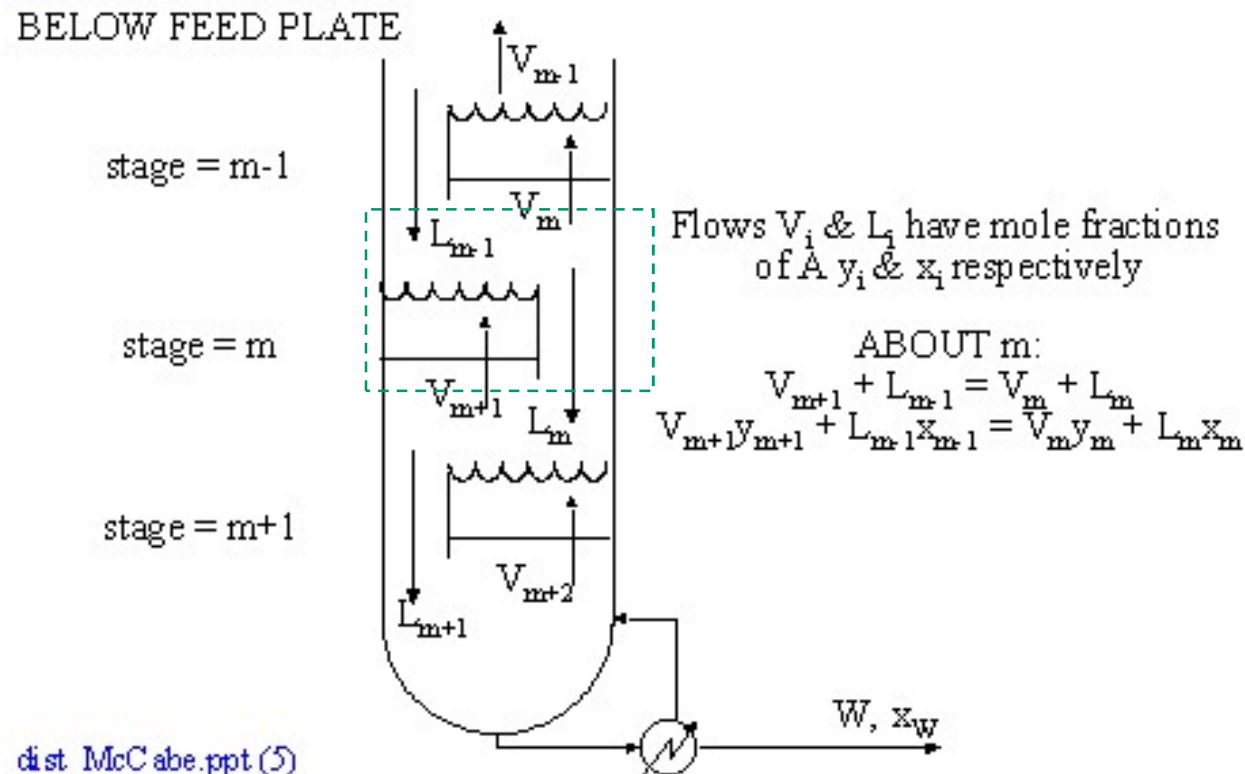


dist McCabe.ppt (3)

Κλασματική Απόσταξη

Unit Operations 1 - Distillation

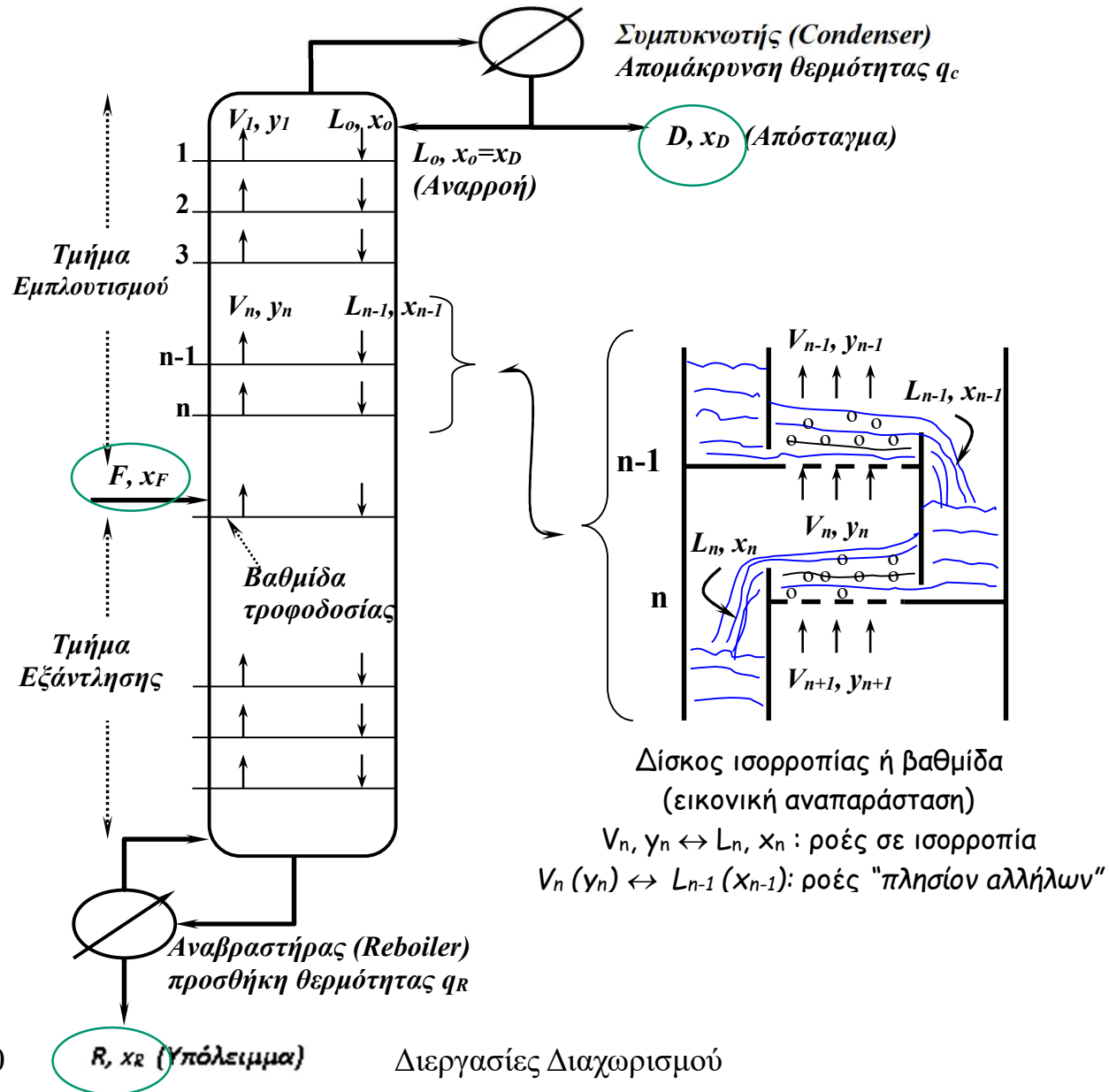
Fractional distillation - McCabe/Thiele



Κλασματική Απόσταξη

- Βασικές απαιτήσεις για την επιλογή της πίεσης λειτουργίας:
 - (i) Να υφίσταται **σημαντική διαφορά πτητικότητας μεταξύ των συστατικών.**
 - (ii) Να είναι δυνατή η υγροποίηση των ατμών στον συμπυκνωτήρα με υπάρχον μη δαπανηρό ψυκτικό μέσο
 - (iii) Να μην έχουμε υπερβολικά μεγάλους όγκους ατμών που απαιτούν μεγάλη διάμετρο στήλης, άρα πάγιο κόστος
 - (iv) Οι θερμοκρασίες της στήλης να μην είναι επικίνδυνα υψηλές
Αύξηση της πίεσης συνεπάγεται δυσχέρεστερος διαχωρισμός (δηλαδή περισσότερες βαθμίδες για να φθάσουμε σε ένα επιθυμητό αποτέλεσμα)

Κλασματική Απόσταξη



Σχεδιασμός Αποστακτικής Στήλης

- Μεταβλητές
 - (1) Πίεση λειτουργίας της στήλης (P)
 - (2) Ρυθμός τροφοδότησης (F)
 - (3) Σύσταση τροφοδότησης (x_F)
 - (4) Ενθαλπία (θερμική κατάσταση) τροφοδότησης h_F ή q
 - (5) Σύσταση αποστάγματος (x_D)
 - (6) Σύσταση υπολείμματος (x_R)
 - (7) Ενθαλπία αναρροής (h_L)
 - (8) Λόγος αναρροής ($R_D=L/D$)

Τα x_F , x_D και x_R αναφέρονται στο πτητικότερο συστατικό)

Ζητούμενο: Ο υπολογισμός των απαιτούμενων θεωρητικών βαθμίδων για ένα δεδομένο διαχωρισμό.